УДК 681.327

А.В. Инютин
Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Беларусь, 220012, г. Минск, ул. Сурганова, 6

Мягкая математическая морфология для фильтрации бинарных изображений

A.V. Inyutin
United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
Surganov St. 6, 220012 Minsk, Belarus

Soft Mathematical Morphology for Filtering of Binary Images

А.В. Інютін
Об'єднаний інститут проблем НАН Білорусі, Білорусь
Білорусь, 220012, м. Мінськ, вул. Сурганова, 6

М'яка математична морфологія для фільтрації бінарних зображень

В статье рассмотрены операторы мягкой морфологии и алгоритмы удаления шума с бинарных изображений на их основе. Алгоритмы отличаются наличием таких дополнительных параметров работы, как порог фильтрации и количество итераций, а также возможностью удаления шума вида островки, проколы, выступы и вырывы за один проход. Применение данных алгоритмов позволяет привнести меньше искажений при работе, даже если объекты изображения располагаются на расстоянии 1 пикселя друг от друга. Приведены результаты экспериментальной проверки работы на примере изображения фотошаблона печатной платы.
Ключевые слова: математическая морфология, фильтрация.

The paper proposes a soft morphological operators and algorithms to remove noise from binary images. The features of the algorithm - is the presence of additional parameters such as the threshold of filtering, number of iterations, and the ability to remove noise form the islands, pin holes, mousebites and spurs in one pass. Application of these algorithms can bring less distortion during operation, even if the image objects are spaced one pixel apart. There are results of the experimental verification of the example of the PCB artwork.
Key words: mathematical morphology, filtering.

У статті розглянуті оператори м'якої морфології та алгоритми видалення завад з бінарних зображень на їх основі. Алгоритми відрізняються наявністю таких додаткових параметрів роботи, як поріг фільтрації та кількість ітерацій, а також можливістю видалення шумових завад виду острівки, проколи, виступи та вибухи за один прохід. Використання даних алгоритмів дозволяє зробити менше помилок при роботі, навіть якщо об'єкти зображення розташовуються на відстані 1 пікселя один від одного. Наведені результати експериментальної перевірки роботи на прикладі зображення фотошаблона друкованої влати.
Ключові слові: математична морфологія, фільтрація.

Введение

Базовые операторы классической математической морфологии – эрозия и дилатация [1-3] выражаются как

$$Dilate(A,B) = \cup \; \{A + b : b \in B\}, \tag{1}$$

$$Erode(A,B) = \cap \; \{A - b : b \in B\}, \tag{2}$$

где A – исходное изображение, B – структурирующий элемент.

Для удаления шума с изображения могут применяться фильтры, основанные на операциях отмыкания и замыкания, которые представляют собой последовательность эрозии и дилатации

$$Open(A,B) = Dilate(Erode(A,B),B) . \quad (3)$$

$$Close(A,B) = Erode(Dilate(A,-B),-B) . \quad (4)$$

В [4], [5] были предложены операторы мягкой морфологии, а также фильтры на их основе, – мягкая эрозия и дилатация сигнала $f : \mathbb{Z}^n \to \mathbb{R}$ по структурирующей системе $[B_1,B_2,k]$ определяется как:

$$f \ominus [B_1,B_2,k]\ (x) = k\text{-у наименьшему значению мультимножества } \{k \lozenge f(b_2) : b_2 \in B_2(x)\} \cup \{f(b_1) : b_1 \in (B_1(x))\} \text{ для всех } x \in \mathbb{Z}^n, \quad (5)$$

$$f \oplus [B_1,B_2,k]\ (x) = k\text{-у наибольшему значению мультимножества } \{ k \lozenge f(b_2) : b_2 \in B_2(x)\} \cup \{f(b_1) : b_1 \in (B_1(x))\} \text{ для всех } x \in \mathbb{Z}^n. \quad (6)$$

Структурирующая система $[B_1,B_2,k]$ состоит из 3 параметров: конечных множеств B_1 и B_2, $B_2 \in B_1$, при этом $B_1,B_2 \in \mathbb{Z}^n$, натуральное число k удовлетворяет условию $1 \le k \le Card(B_1)$. Множество $B = B_1 \cup B_2$, $B_1 \cap B_2 = \varnothing$ называется структурирующим множеством, B_2 – центром, B_1 – границей, k – порядковым индексом центра (параметр повторяемости).

В [6], [7] предложено следующее определение операторов бинарной мягкой морфологии:

$$A \ominus [B_1,B_2,k]\ (x) = \{ x \in A \mid (k \times Card[A \cap (B_1)_x] + Card[A \cap (B_2)_x] \ge k \times \mathrm{Card}[B_1] + Card[B_2] - k + 1\}, \quad (7)$$

$$A \oplus [B_1,B_2,k]\ (x) = \{ x \in A \mid (k \times Card[A \cap (B_1^S)_x] + Card[A \cap (B_2^S)_x] \ge k, \quad (8)$$

где k – порядковый индекс, который определяет, сколько раз элементы ядра учитываются в конечном результате. Если $k = 1$ или $B = B_1$ ($B_2 = \varnothing$), то операторы мягкой морфологии превращаются в стандартные операторы математической морфологии.

Операторы математической морфологии, основанные на использовании нечетких множеств, предложены в [8]. В данном подходе нечеткость определяется тем, насколько структурирующий элемент вписывается в изображение. На сегодняшний день не существует единого подхода для определения нечеткой эрозии и дилатации. В [9-18], [8] даются различные определения базовых операторов нечеткой морфологии, отличающиеся результатами работы. Например, согласно [8], операторы нечеткой эрозии и дилатации по нечеткому структурирующему элементу в терминах функций принадлежности имеют следующий вид:

$$\mu_{A \ominus B}(x) = \min_{y \in B} [\min[1,\ 1 + \mu_A(x+y) - \mu_B(y)]] = \min[1,\ \min_{y \in B} [1 + \mu_A(x+y) - \mu_B(y)]], \quad (9)$$

$$\mu_{A \oplus B}(x) = \max_{y \in B} [\min[0,\ \mu_A(x-y) + \mu_B(y) - 1]] = \max[0,\ \max_{y \in B} [\mu_A(x-y) + \mu_B(y) - 1]], \quad (10)$$

где $x, y \in \mathbb{Z}^2$ – пространственные координаты, а μ_A и μ_B – функции принадлежности изображению и структурирующему элементу.

В [19-21] приводится описание подхода, объединяющего нечеткую и мягкую морфологию. Операторы мягкой нечеткой эрозии и дилатации выглядят следующим образом (определение для нечеткой морфологии использовалось согласно [8]):

$$\mu_{A\ \ominus[\mathrm{B1,\,B2},\,k]}(x) = \min[1, \min_{y\in B1,\, z\in B2}{}^{(k)}(\{k \lozenge (\mu_A(x+y) - \mu_{B1}(y) + 1)\} \cup \{\mu_A(x+z) - \mu_{B2}(z) + 1\})], \quad (11)$$

$$\mu_{A\ \oplus[\mathrm{B1,\,B2},\,k]}(x) = \max[0, \max_{(x-y)\in B1,\,(x-z)\in B2}{}^{(k)}(\{k \lozenge (\mu_A(x-y) + \mu_{B1}(y) - 1)\} \cup \{\mu_A(x-z) + \mu_{B2}(z) - 1\})], \quad (12)$$

где $x, y, z \in \mathbb{Z}^2$ – пространственные координаты, а μ_A, μ_{B1} и μ_{B2} – функции принадлежности изображению A, ядру B_1 и мягкой границе B_2 структурирующего элемента. Для нечеткого структурирующего элемента выполняются условия $B \in \mathbb{Z}^2 : B = B_1 \cup B_2$, $B_1 \cap B_2 = \varnothing$. Если k = 1, то операторы мягкой нечеткой морфологии превращаются в операторы нечеткой математической морфологии.

Следует отметить, что публикации в литературе подтверждают актуальность использования мягкой [22-25] и нечеткой [15], [26-28] морфологии для обработки изображений.

Алгоритмы фильтрации изображения на базе операторов мягкой морфологии

В [29], [30] предложены операторы мягкой морфологии, которые сочетают в себе элементы мягкой и нечеткой морфологии:

1) как и в мягкой математической морфологии, предлагаемый структурирующий элемент состоит из мягкой границы, но отличается тем, что ядро структурирующего элемента равно пустому подмножеству;

2) как и в нечеткой морфологии, принцип работы основан на возможности вписать структурирующий элемент в изображение, но сам элемент не рассматривается как нечеткое множество.

Термин «мягкий» используется для того, чтобы показать, что для одного и того же структурирующего элемента можно получить различные результаты, изменяя значение порога фильтрации.

Операторы мягкой морфологии имеют следующий вид:

$$SoftErode(A,B,t) = \left\{ \begin{matrix} n_s + t \le n_n \to a = 0 \\ n_s + t > n_n \to a = 1 \end{matrix}, a \in A \right\}, \quad (13)$$

$$SoftDilate(A,B,t) = \left\{ \begin{matrix} n_s + t \le n_n \to a = 1 \\ n_s + t > n_n \to a = 0 \end{matrix}, a \in A \right\}, \quad (14)$$

элемента, совпавших по значению с ненулевыми пикселями структурирующего элемента, $n_n = \sum_i (a_i \wedge b_i)$ – число пикселей на изображении в маске структурирующего элемента, значение которых не совпало со значением соответствующих пикселей структурирующего элемента, t – порог фильтрации, a – пиксели исходного черно-белого изображения A, b– пиксели плоского структурирующего элемента B. Термин – плоский структурирующий элемент обозначает, что его пиксели могут принимать значения 0 и 1.

Исходными данными является бинарное изображение. Параметры работы – размер и форма структурирующего элемента, значение порога фильтрации или зна-

чение порогов для операций эрозии и дилатации, если для этих операций используются разные пороги. Результат – бинарное изображение.

Для удаления шума с изображения предлагается использовать операции мягкого отмыкания и замыкания, которые имеют вид:

$$SotfOpen(A,B,t) = SoftDilate(SoftErode(A,B,t),B,t), \tag{15}$$

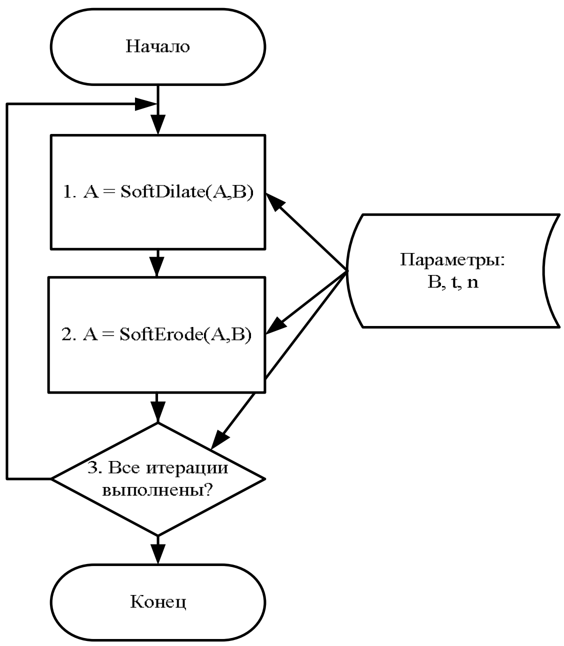
$$SotfClose(A,B,t) = SoftErode(SoftDilate(A,B,t),B,t). \tag{16}$$

Исходными данными является бинарное изображение. Параметры фильтрации – размер и форма структурирующего элемента, количество проходов фильтра, значение порога фильтрации или значение порогов для операций эрозии и дилатации, если для этих операций используются разные пороги. Результат – бинарное изображение.

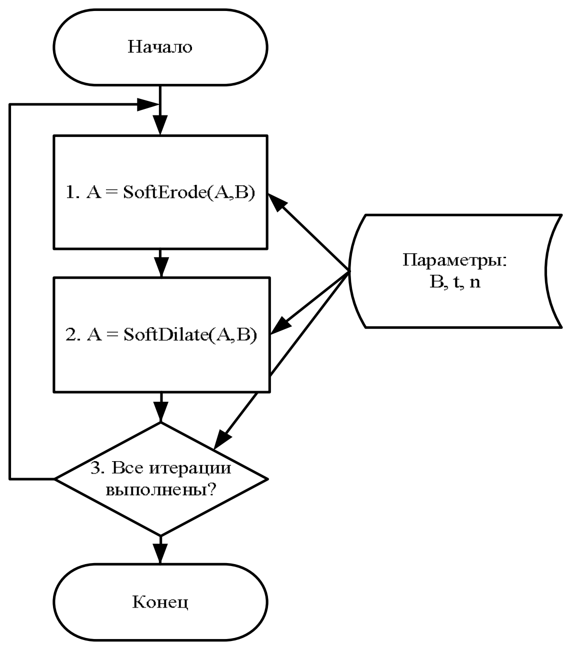
Мягкое отмыкание и замыкание не обладают свойством идемпотентности, поэтому могут многократно применяться с одним структурирующим элементом, и это свойство предлагается использовать для конструирования мягких морфологических фильтров. Алгоритм фильтрации изображения на основе операций мягкого отмыкания и замыкания приведен на рис. 1.

Параметры фильтрации – это структурирующий элемент *B* (его размер и форма), порог фильтрации *t* и количество итераций фильтра *i*.

Также можно использовать последовательные мягкие морфологические фильтры, которые обозначаются *SOC*, *SCO*, *SOCO*, *SCOC* и т.д., где сокращениями *SO* и *SC* обозначаются операции мягкого отмыкания и замыкания. Данные фильтры сглаживают неровности краев элементов аналогично фильтрам классической математической морфологии. А с предложенными операторами мягкой морфологии можно использовать фильтры $i_{so}SO$, $i_{sc}SC$, $i_{so}SOi_{sc}SC$, $i_{sc}SCi_{so}SO$ и т.д., где i_{so} – количество итераций мягкого отмыкания, а i_{sc} – количество итераций мягкого замыкания. Количество проходов фильтра задается в зависимости от качества входного изображения.



а)



б)

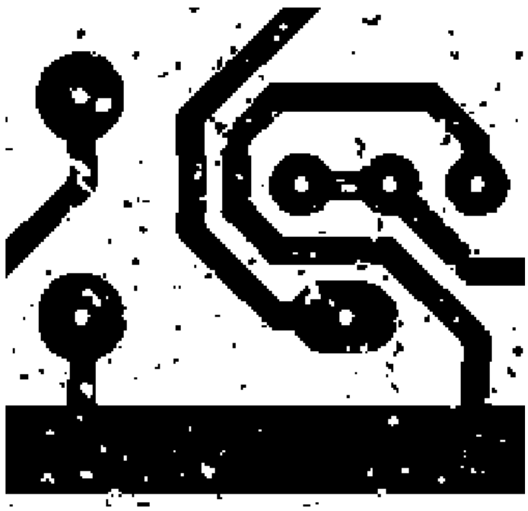
Рисунок 1 – Алгоритмы фильтрации операциями мягкой морфологии:
а) отмыкание, б) замыкание

Экспериментальные результаты применения мягкого морфологического фильтра

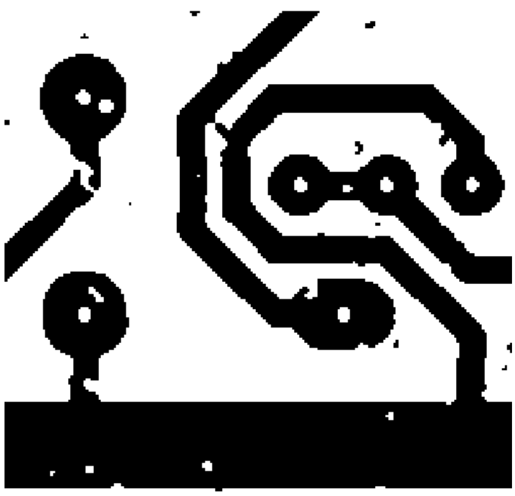
На примере изображений фотошаблона ПП рассмотрим преимущества и особенности применения мягкого морфологического фильтра. На рис. 2*а* приведен фрагмент исходного полутонового изображения фотошаблона ПП с шумом. Размер изображения 1596 × 1007 пикселей , 1 пиксель изображения соответствует 42,3 мкм. Результат операции мягкого отмыкания по квадратному структурирующему элементу размером 3 × 3 пикселя с порогом 0 приведен на рис. 2*б*, а результаты классических операций отмыкания и замыкания по тому же структурирующему элементу на рис. 2*в* и *г*, соответственно. Оценка качества фильтрации вычислялась как

$$Q = 1 - \text{count}\,(\mathit{Test}\ \text{XOR}\ \mathit{Etalon})\,/\,\text{size}\,(\mathit{Test}), \tag{17}$$

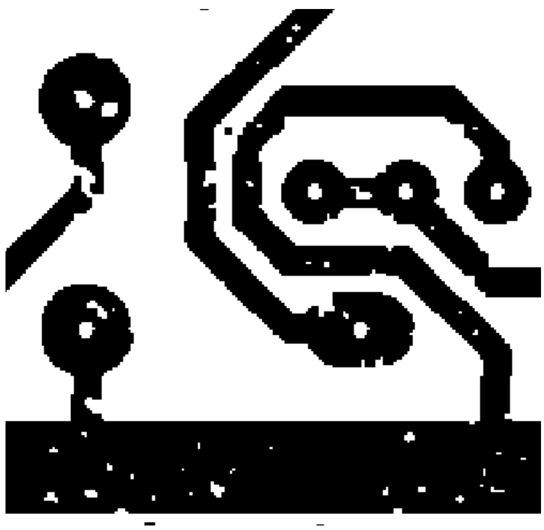
где *Test* – результат фильтрации, *Etalon* – изображение эталонного фотошаблона без шума, count() – операция вычисления количества ненулевых пикселей. Оценка приведена в табл. 1 и 2.



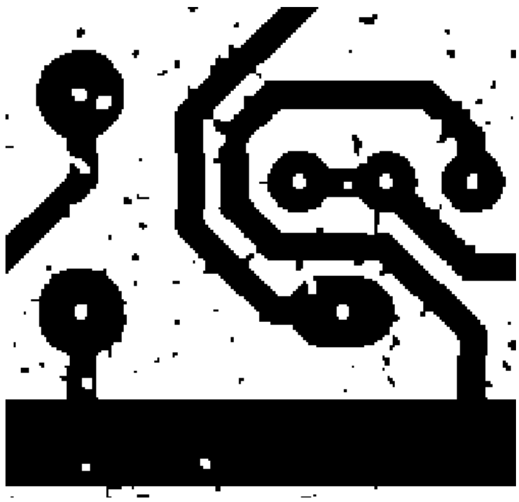
а)



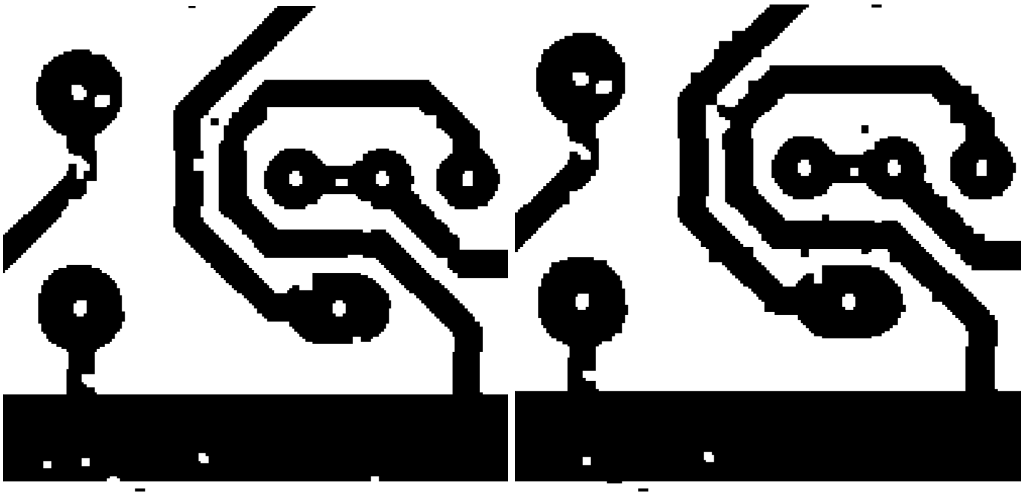
б)



в)



г)



д) е)

Рисунок 2 – Результаты работы морфологического фильтра по квадратному структурирующему элементу размером 3 х 3 пикселя: а) исходное изображение фрагмента фотошаблона печатной платы с шумом, б) мягкое отмыкание SoftOpen(A,B,0), в) отмыкание Open(A,B), г) замыкания Close (A,B), д) CloseOpen(A,B), е) OpenClose (A,B)

Таблица 1 – Качество фильтрации при использовании структурирующего элемента размером 3 х 3 пикселя

Значение порога фильтрации *t*	Качество фильтрации			
	SoftOpen(*A*,*B*,*t*)		SoftClose(*A*,*B*,*t*)	
	B – квадрат	B – ромб	B – квадрат	B – ромб
0	0.99286	0.98481	0.99286	0.98876
2	0.99172	0.9901	0.99116	0.99135
4	0.99254	0.98795	0.99045	0.98795
6	0.99167	0.99135	0.98832	0.9901
8	0.99061	0.98876	0.98532	0.98481
Классическая морфология	Open(*A*,*B*) 0.99061	Open(*A*,*B*) 0.98876	Close(*A*,*B*) 0.98532	Close(*A*,*B*) 0.98481

Таблица 2 – Качество фильтрации при использовании структурирующего элемента размером 5 × 5 пикселей

Значение порога фильтрации *t*	Качество фильтрации			
	SoftOpen(*A*,*B*,*t*)		SoftClose(*A*,*B*,*t*)	
	B – квадрат	B – ромб	B – квадрат	B – ромб
0	0.99006	0.98189	0.98972	0.98866
2	0.98945	0.9889	0.98872	0.99209
4	0.9885	0.98956	0.98756	0.99218
6	0.98896	0.99011	0.98731	0.99195
8	0.98998	0.99125	0.98771	0.99212
10	0.99065	0.99263	0.988	0.99284
12	0.9897	0.99428	0.98659	0.99428
14	0.98855	0.99284	0.9854	0.99263
16	0.98898	0.99178	0.98455	0.99096
18	0.98928	0.99195	0.98417	0.99057
20	0.98998	0.99218	0.98297	0.98993
22	0.98866	0.99209	0.97961	0.98808
24	0.98599	0.98866	0.97519	0.98157
Классическая морфология	Open(*A*,*B*) 0.98599	Open(*A*,*B*) 0.98866	Close(*A*,*B*) 0.97519	Close(*A*,*B*) 0.98157

Классическая операция отмыкания удаляет островки с изображения; сглаживает выступы; увеличивает вырывы; образует разрывы. А классическая операция замыкания удаляет проколы с изображения; сглаживает вырывы; увеличивает выступы; образует короткие замыкания.

Для высокого качества фильтрации необходимо удалить как островки, так и проколы, сгладить как выступы, так вырывы. Поэтому можно применить последовательный фильтр CloseOpen(*A*,*B*) (рис. 2*д*) или OpenClose(*A*,*B*) (рис. 2*е*). Оценка качества фильтрации приведена в табл. 3 и 4.

Таблица 3 – Качество работы последовательного фильтра с использованием структурирующего элемента размером 3 × 3 пикселя

Значение порога фильтрации *t*	Качество фильтрации			
	SoftOpenClose(*A*,*B*,*t*)		SoftCloseOpen(*A*,*B*,*t*)	
	B – квадрат	B – ромб	B – квадрат	B – ромб
0	0.99462	0.99086	0.99462	0.99067
2	0.99101	0.99352	0.99127	0.99338
4	0.99164	0.98804	0.99191	0.98804
6	0.99356	0.99338	0.99363	0.99352
8	0.99382	0.99067	0.99397	0.99086
Классическая морфология	OpenClose(*A*,*B*) 0.99382	OpenClose(*A*,*B*) 0.99067	CloseOpen(*A*,*B*) 0.99397	CloseOpen(*A*,*B*) 0.99086

Таблица 4 – Качество работы последовательного фильтра с использованием структурирующего элемента размером 5 х 5 пикселей

Значение порога фильтрации *t*	Качество фильтрации			
	SoftOpenClose(*A*,*B*,*t*)		SoftCloseOpen(*A*,*B*,*t*)	
	B – квадрат	*B* – ромб	*B* – квадрат	*B* – ромб
0	0.98695	0.99092	0.98697	0.99105
2	0.98416	0.99388	0.9836	0.99397
4	0.98241	0.99005	0.98216	0.99023
6	0.98218	0.98934	0.98253	0.98959
8	0.98345	0.98969	0.98425	0.98887
10	0.9867	0.99113	0.98662	0.99117
12	0.98417	0.99512	0.98326	0.99512
14	0.98315	0.99117	0.98254	0.99113
16	0.98389	0.98837	0.98371	0.98902
18	0.98565	0.99006	0.98485	0.98972
20	0.98697	0.99078	0.98675	0.99041
22	0.98799	0.99318	0.98778	0.99335
24	0.98687	0.99084	0.98665	0.99082
Классическая морфология	OpenClose(*A*,*B*) 0.98687	OpenClose(*A*,*B*) 0.99084	CloseOpen(*A*,*B*) 0.98665	CloseOpen(*A*,*B*) 0.99082

Классический последовательный фильтр лучше удаляет шум, чем фильтр, использующий только одну операцию вида отмыкание или замыкание. Последовательный фильтр на базе операторов мягкой морфологии лучше удаляет шум, чем последовательный фильтр, использующий операции классической мягкой морфологии. Однако из рис. 2*б* видно, что фильтр, использующий только операцию мягкого отмыкания или замыкания, удаляет как островки, так и проколы, сглаживает и выступы, и вырывы за один проход, поэтому целесообразным является выбор именно такого фильтра в случае необходимости высокой скорости работы, т.е. когда незначительно повышение качества фильтрации (например, с 0.99286 до 0.99462, как в случае с операциями SoftOpen(*A*,*B*,*t*)

и SoftCloseOpen (A,B,t)) является меньшим преимуществом, чем сокращение вычислений в процессе фильтрации в 2 раза.

На рис. 3 показан фрагмент фотошаблона с выделенными областями обрыва и короткого замыкания.

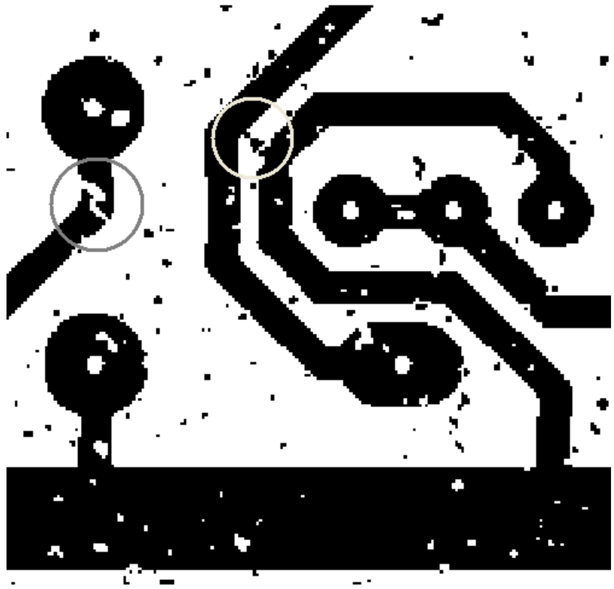


Рисунок 3 – Фрагмент фотошаблона с выделенными областями разрыва и короткого замыкания

На рис. 2 видно, что применение операций классической морфологии для удаления шума привело к смыканию обрыва и разрыву короткого замыкания на исходном зашумленном изображении.

Если отфильтрованное изображение подать на вход системы контроля дефектов топологии, то данные дефекты не будут найдены. Отсюда следует недостаток фильтра, использующего классические операции отмыкания, замыкания или их комбинацию, который заключается в недостаточной чувствительности такого фильтра, то есть образовании смыканий или обрывов на изображении при близком расположении объектов.

В данном случае, под близким следует понимать расположение объектов на расстоянии меньше радиуса структурирующего элемента. Например, минимальным симметричным структурирующим элементом, использование которого не сдвигает изображение, является ромб размером 3 × 3 пикселя.

Радиус такого элемента равен 2, и при расстоянии между объектами, равному 1 пикселю, происходит искажение топологии, т.е. образуются короткие замыкания или обрывы.

Использование операторов мягкой морфологии с дополнительным параметром – порогом фильтрации, позволяет сохранить топологию печатной платы в процессе удаления шума, даже если объекты изображения располагаются на расстоянии 1 пикселя друг от друга.

Выводы

На базе операторов мягкой математической морфологии предложены алгоритмы фильтрации, отличающиеся наличием дополнительных параметров работы, таких как порог фильтрации и количество итераций. В отличие от классических фильтров на базе отмыкания и замыкания, фильтр обладает свойством удалять шум вида островки,

проколы, выступы и вырывы за один проход без применения последовательных фильтров. Применение данных алгоритмов позволяет привнести меньше искажений при работе, даже если объекты изображения располагаются на расстоянии 1 пикселя друг от друга.

Экспериментальная проверка работы мягкого морфологического фильтра на примере изображения фотошаблона печатной платы показала лучшие результаты по сравнению с классическими морфологическими фильтрами.

Литература

1. Giardina C.R. Morphological method in image and signal processing / C.R. Giardina, E.R. Dougherty. – Prentice Hall, New Jersey, 1988.
2. Serra J. Image analysis and Mathematical Morphology / Serra J. – Academic Press, New York, 1982.
3. Матерон Ж. Случайные множества и интегральная геометрия / Матерон Ж. – М. : Мир, 1978. – 318 с.
4. Koskinen L. Soft morphological filters / Lasse Koskinen [et al.] // Proc. SPIE. Image Algebra and Morphological Image Processing II – 1991. – Vol. 1568. – P. 262-270.
5. Kuosmanen P. Soft morphological filtering / Pauli Kuosmanen and Jaakko Astola // Journal of Mathematical Imaging and Vision. – 1995. – Vol. 5, № 3. – P. 231-262.
6. Pu C. Threshold Decomposition of Grey-Scale Soft Morphology into Binary Soft Morphology / Christopher C. Pu, Frank Y. Shih // CVGIP – Graphical Models and Image Processing. – 1995. – Vol. 57, № 6. – P. 522-526.
7. Shih F. Analysis of the properties of soft morphological filtering using threshold decomposition/ Frank Y. Shih, Christopher C. Pu // IEEE Trans. Signal Processing. – 1995. – Vol. 43, № 2. – P. 539-544.
8. Informatics. – 2012. – Vol. 16, № 1. – P. 76-86.
9. Sinha D. Fuzzy mathematical morphology / Divyendu Sinha, Edward R. Dougherty // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 1992. – Vol. 3, № 3. – P. 286-302.
10. Bloch I. Duality vs. adjunction for fuzzy mathematical morphology and general form of fuzzy erosions and dilations / Isabelle Bloch // Fuzzy Sets and Systems. – 2009. – Vol. 160, № 13. – P. 1858-1867.
11. Bloch I. Fuzzy connectivity and mathematical morphology / Isabelle Bloch // Pattern Recognition Letters. – 1993. – Vol. 14, № 6. – P. 483-488.
12. Bloch I. Fuzzy mathematical morphologies: A comparative / Isabelle Bloch, Henri Maitre // Pattern Recognition. – 1995. – Vol. 28, № 9. – P. 1341-1387.
13. Bloch I. Lattices of fuzzy sets and bipolar fuzzy sets, and mathematical morphology / Isabelle Bloch // Information Sciences. – 2011. – Vol. 181, № 10. – P. 2002-2015.
14. Bloch I. Spatial reasoning under imprecision using fuzzy set theory, formal logics and mathematical morphology / Isabelle Bloch // International Journal of Approximate Reasoning. – 2006. – Vol. 41, № 2. – P. 77-95.
15. Maccarone M.C. Fuzzy mathematical morphology: Concepts and applications / Maria Concetta Maccarone // Vistas in Astronomy. – 1996. – Vol. 40, № 4. – P. 469-477.
16. Nachtegael M. A study of interval-valued fuzzy morphology based on the minimum-operator / M. Nachtegael [et al.] // Proc. SPIE 7546 – Proc. of Second International Conference on Digital Image Processing, 26 February 2010, Singapore / ed. Kamaruzaman Jusoff, Yi Xie. – 2010. – SPIE Vol. 7546. – P. 75463H–1–7.
17. Nachtegael M. Classical and fuzzy approaches towards mathematical morphology / M. Nachtegael, E.E. Kerre // Fuzzy Techniques in Image Processing / E.E. Kerre and M. Nachtegael, eds. – 2000. – Springer Verlag Berlin / Heidelberg. – P. 3-57.
18. Nachtegael M. Connections between binary, gray-scale and fuzzy mathematical morphologies / Mike Nachtegael, Etienne E. Kerre // Fuzzy Sets and Systems. – 2001. – Vol. 124, № 1. –P. 73-85.
19. Wu M. Fuzzy Morphology and Image Analysis / Minjin Wu // Proc. of the 9th. ICPR, Rome, 14 – 17 Nov 1988. – 1988. – Vol. 1. – P. 453-455.
20. Binary, gray-scale and vector soft mathematical morphology: Extensions, algorithms, and implementations / M. I. Vardavoulia [et al.] // Advances in Imaging and Electron Physics. – 2001. – Vol. 119. – P. 1-53.
21. Gasteratos A. Non-linear image processing in hardware / A. Gasteratos, I. Andreadis // Pattern Recognition. – 2000. – Vol. 33, № 6. – P. 1013-1021.
22. Gasteratos A. Soft Mathematical Morphology: Extensions, Algorithms and Implementations / Antonios Gasteratos, Ioannis Andreadis // Invited Contribution, Advances in Imaging and Electron Physics. – 1999. – Vol. 110, Ch. 3. – P. 63-99.

23. Liu T. Infrared small targets detection and tracking based on soft morphology Top-Hat and SPRT-PMHT / Tan Liu, Xiang Li // Proc. of 3rd International IEEE Congress on Image and Signal Processing (CISP). Shanghai, 2010. – 2010. – Vol. 2. – P. 968-972.
24. Tickle A. Upgrading to a Soft Multifunctional Image Processor for Implementation on a Field Programmable Gate Array with Additional Biasing and Logical Capabilities / Andrew J. Tickle [et al.] // Proc. of SPIE Optical Design and Engineering III / ed. by Laurent Mazuray [et al.]. – 2008. –SPIE Vol. 7100. – 71002H–1–12.
25. Tian Y. Optimization of Soft Morphological Filters with Parallel Annealing-Genetic Strategy / Ye Tian, Chun-hui Zhao // Proc. of First International Conference on Pervasive Computing Signal Processing and Applications (PCSPA), Harbin, China, 17 – 19 Sept. 2010. – 2010. – P. 576-581.
26. Yan X. Edge detection for Feather and down image via BEMD and soft morphology / Xiaofei Yan, Yanqiu Wang // Proc. of International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), Harbin, China 24-26 Dec. 2011. – Vol. 3. – P. 1603-1607.
27. Fatichah C. Interest-Based Ordering for Fuzzy Morphology on White Blood Cell Image Segmentation / Chastine Fatichah [et al.] // Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent
28. Sussner P. Classification of Fuzzy Mathematical Morphologies Based on Concepts of Inclusion Measure and Duality / Peter Sussner and Marcos Eduardo Valle // Journal of Mathematical Imaging and Vision. – 2008. – Vol. 32, № 2. – P. 139-159.
29. Yang X. Fuzzy Morphology Based Feature Identification in Image Processing / Xiaoyi Yang // Fuzzy Information and Engineering: Advances in Intelligent and Soft Computing. – 2010. – Vol. 78. –P. 607-615.
30. Inyutin A.V. Image filtering with usage of soft morphology operations / A.V. Inyutin // Artificial intelligence. – 2007. – № 3. – C. 217-228.
31. Inyutin A.V. The image filtration with use of operators of soft morphology / A.V. Inyutin // Proceedings of the Fifth International Conference on Neural Networks and Artificial Intelligence May 27 – 30, 2008, Minsk, Belarus – Минск, 2008. – P. 173-176

RESUME

A.V. Inyutin

Soft Mathematical Morphology for Filtering of Binary Images

The paper proposes a soft morphological operators and algorithms to remove noise from binary images. The features of the algorithm - is the presence of additional parameters such as the threshold of filtering, number of iterations, and the ability to remove noise form the islands, pin holes, mousebites and spurs in one pass. Application of these algorithms can bring less distortion during operation, even if the image objects are spaced one pixel apart. There are results of the experimental verification of the example of the PCB artwork.

Статья поступила в редакцию 16.07.2013.